

滇池流域磷循环系统的物质流分析

刘毅, 陈吉宁

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 研究营养元素在社会经济系统中的物质代谢结构及特征, 是有效预防和控制地表水体富营养化的关键性分析技术之一。以滇池流域磷循环为研究案例, 运用物质流分析方法建立了 2000 年流域静态物质流模型 (PHOSFAD), 并在此基础上识别出流域磷循环系统的总体结构特征, 以及资源开采、化工生产、农业种植、畜禽养殖、居民生活等生产和消费部门的物质利用效率特征, 为科学防治滇池水体富营养化提供了重要决策依据和参考。

关键词: 物质代谢; 物质流分析; 磷; 水体富营养化; 滇池流域

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)08-1549-05

Substance Flow Analysis on Phosphorus Cycle in Dianchi Basin, China

LIU Yi, CHEN Jining

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Investigation of physical profiles of nutrients within socio-economic systems is one of the key approaches to cure eutrophication. Applying a substance flow analysis (SFA) method for the case of Dianchi basin located in southwest of China, we established a regional static SFA model (PHOSFAD) in 2000 via balancing societal phosphorus flows. Aggregate characteristics of the overall phosphorus throughput, and physical efficiencies in relation to phosphorus uses of production and consumption sectors, including mining, processing, farming, livestock husbandry and household consumption, were subsequently identified. The methodology and results of this study illustrate applicability and value for rational decision-making aiming to curb eutrophication of Dianchi Lake.

Key words: material metabolism; substance flow analysis; phosphorus; eutrophication; Dianchi Basin

现代经济社会中资源开采、加工制造、产品消费、废物处置、循环再生等一系列由于人类活动所导致的物质流动, 即物质的社会代谢极大地扰动了自然循环系统的结构与通量, 是诸多环境问题产生的根本原因^[1,2]。

地表水体富营养化是我国面临的水污染核心问题之一。然而, 由于长期忽视营养元素代谢系统的整体结构优化与生态效率的提升, 目前我国水体富营养化控制体系中缺乏全面的结构性调控措施和系统性政策方案, 已有措施大多局限在局部和末端的污染负荷削减, 实施成本高昂且生态效率低下, 不能有效地遏制持续恶化的水体富营养化趋势^[3,4]。

本文以滇池流域磷元素代谢系统为例, 运用现代物质流分析技术建立流域静态磷物质流分析模型, 从物质循环角度定量分析社会经济系统中磷的开采、生产、消费、废弃、循环等基本过程, 系统识别物质流结构与物质代谢效率特征, 以及由此产生的影响水体环境质量的途径与机制, 从而为有效控制滇池水体富营养化提供科学决策依据。

1 滇池流域磷代谢系统建模方法

环境问题本质上是由于物质的社会代谢结构不

合理所引发的生态后果。然而, 传统上基于货币资本的经济核算方法不能恰当和有效地描述现代社会中的资源开采、物质利用、废弃处置等一系列物质代谢过程^[5,6]。因此, 采用整体性、系统化的研究方法, 通过分析各种物质材料在现代经济社会中的开采、加工、使用、废弃、处置、再生利用的全生命周期过程, 重新审视经济增长的基本动力与规律以及对于环境所产生的影响, 进而为解决社会经济的长期稳定发展提供新的认知视角与政策依据, 成为近 10 多年开展物质代谢研究的主要内容^[2,3]。

源于 20 世纪 90 年代初的现代物质流分析技术, 为系统深入地识别社会经济系统中物质代谢规律及其所产生的结构性资源环境影响提供了定量分析方法, 并逐渐发展成为转变生产和消费模式、提高物质代谢效率的重要研究范式 and 基础技术平台^[7]。与传统环境经济研究方法相比, 物质流分析技术具有以下基本特征: ①以热力学第一定律, 即物质守恒原理为基本分析原则, 以物料衡算为基本分析方

收稿日期: 2005-06-27; 修订日期: 2005-10-18

基金项目: 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目

作者简介: 刘毅(1975~), 男, 博士, 助研, 主要研究方向为环境系统分析和环境政策, E-mail: yi.liu@tsinghua.edu.cn

法^[8], 即: 输入= 输出+ 累积- 释放; ②以研究对象的物理性状指标作为定量分析单位, 这与在现金资本流分析中以货币为测度单位类似^[9]; ③以物质代谢过程为分析结构框架, 构建人类经济活动与自然生态系统之间的物质联系, 追踪物质在系统内部与系统之间的迁移和转化途径, 识别和评价物质流向、规模和强度等多个层次上的合理性及其影响, 进而提出新的解决方案^[10].

建立物质流分析模型, 首先应根据研究中物质对象的经济属性、环境属性以及研究目的, 概化和定义物质代谢系统边界与结构框架, 主要包括确定物质生产部门、消费部门、原材料和产品贸易、物质积累和贮存、废物再生利用与处理处置、物质流向与交换关联等关键环节^[11].

本文采用一个网络状概念模型用以描述磷的社会代谢过程, 如图 1 所示^[12]. 首先, 磷矿资源通过采掘业子系统从自然界进入社会经济系统, 采掘和矿石粗选过程中产生数量巨大的含磷尾矿和废渣等固体废弃物. 其次, 磷化工业进一步对原矿石进行选矿和洗矿等物理加工以及化学冶炼, 在制取磷酸等化工原料和磷化肥等化工产品的同时, 排放含磷工业废水和以磷石膏为主的化工废渣, 除少量磷得以回收利用外, 大部分以工业污泥、固体废物等形式排放到环境中. 第三, 磷化肥作为最主要的磷化工业产品在种植业中广泛使用, 而进入作物中的磷则通过农产品消费或其废弃物利用与畜禽养殖业和居民生活产生关联, 未被利用的养分累积在土壤中, 易于随农田径流进入水体, 并直接影响到滇池水质. 第四, 养殖动物通过饲料和粪便与作物磷的再分配和有机磷的再利用密切相关, 由于家庭饲养与集中养殖部门具有完全不同的磷代谢特征, 在模型中分别予以考虑. 最后, 模型以 2 个子系统的形式分别对城市和农

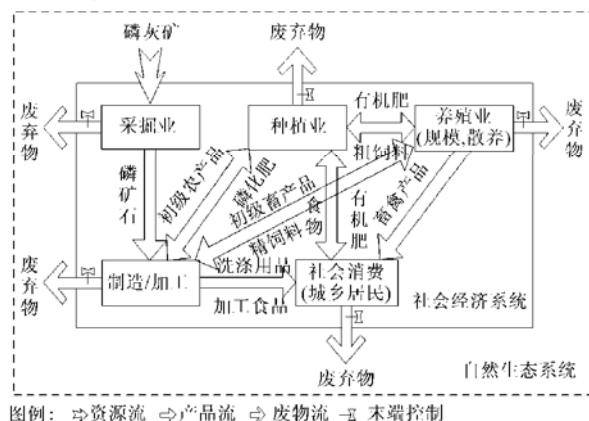


图 1 网络状营养结构的磷代谢概念模型

Fig. 1 Conceptual SFA model of phosphorus flow network

村居民排泄物、生活污水、生活垃圾中磷的处理和循环利用进行物质平衡. 上述 7 个子系统涵盖了磷元素在社会经济系统中的主要代谢过程, 构成带有显著地区特征, 且相互关联、相互作用的一个有机整体, 对滇池水体富营养化形成协同影响. 由于物质通量强度或速率相对较小, 模型中不考虑大气沉降等自然因素引起的物质流过程. 对于底泥释放, 因其主要在自然水系统中转移, 与社会经济系统的交换量相对较小, 模型中也不予考虑.

在现有数据条件下, 本文建立滇池流域的静态磷物质流分析模型, 基准年为 2000 年. 模型假设流域物质代谢系统处于稳定状态, 即在生产和消费部门中磷的积累和释放相互抵消, 由此物质守恒定律可简化为“输入= 输出”. 计算数据主要来源包括《昆明统计年鉴》和滇池周边各县区统计年鉴, 地方政府部门和科研单位已有研究成果, 以及清华大学环境科学与工程系主持的“滇池面源污染控制技术”项目现场调研资料.

2 滇池流域概况与水体富营养化

滇池是我国著名的高原淡水湖泊, 位于云南省昆明市西南, 流域面积 2 920 km², 年径流量为 5.7 亿 m³, 整个流域南北长 114 km, 东西平均宽 25.6 km. 滇池水面面积 298 km², 平均水深 4 m, 蓄水量 12.9 亿 m³, 是一个典型的浅水湖泊.

2000 年滇池流域总人口为 223 万 (不包括流动人口), 城镇人口比例 68.1%, 人口密度 591.0 人/km², 人均耕地面积为 0.018 hm²/人. 滇池流域磷矿储量丰富, 磷化工产业活动强度较高, 种植业以蔬菜、花卉种植产业为主导, 种植面积占流域农作物播种面积的 28.2%.

滇池水质的恶化始于 20 世纪 70 年代, 进入 90 年代以来水体富营养化日趋严重, 已成为整个地区发展的重要制约因素^[13]. 据不完全统计, 1990~1998 年期间, 通过各种渠道投入滇池治理的资金已达 30.95 亿元^[14]. 然而, 由于湖泊水体生态恢复过程的复杂性和长期性, 也由于已有措施中普遍存在着注重工程技术、忽略政策引导; 特别是未能从整体上系统地识别流域内营养元素的社会代谢机理及其潜在的结构性调整手段, 因此虽然在局部防治上取得一定成效, 但却未能从根本上解决滇池水体富营养化控制问题^[4, 15, 16].

3 滇池流域静态磷物质流建模

本节建立 2000 年滇池流域的静态磷物质流分

析模型(以下简称 PHOSFAD 模型)。

图 2 为 PHOSFAD 模型的示意图. 该模型包括“节点”和“箭头”2 个基本构成要素. 节点表示磷的生产部门、消费过程或废物处理过程, 联结 2 个节点之间的箭头则表征磷在不同环节之间的流动过程. 为区分不同类型的物质流, 资源流和耕地土壤累积物质流分别用 R_s 和 F_s 表示, 进入非耕地土壤和滇池水体的物质流过程分别标以 S_i ($i = 1, \dots, 10$) 和 W_j ($j = 1, \dots, 12$), 输出到流域外的物质流用 E_k ($k = 1, \dots, 4$) 表示. M_l ($l = 1, \dots, 3$)、 F_m ($m = 1, \dots, 6$)、 L_n ($n = 1, \dots, 6$)、 R_x ($x = 1, \dots, 8$) 和 U_y ($y = 1, \dots, 9$) 分别指采掘业、磷化工、种植业、养殖业、城乡居民等生产和消费物质流过程. 此外, 由于缺少统计数据, 特别是滇池流域与外流域之间的磷产品贸易

易通量(包括饲料、粮食、肉类等), 为表征磷代谢体系的结构也同时平衡各节点物流通量, 模型中定义了“名义物流”的概念, 即指实际发生但无法准确定量的物质流过程, 模型中用 N_z ($z = 1, \dots, 8$) 标识的虚线箭头表示. 虽然不能逐个确定名义物流的绝对数值, 但是通过节点平衡可以精确地计算得到若干名义物流组合的累积值, 这种建模方式对于识别系统整体与各节点代谢特征不产生影响.

建模公式可分为 3 类: 定值方程用于描述独立于其它变量且具有固定值的物质流过程, 其数值可通过统计资料获得; 从属方程用于计算依赖于其它物质流过程的物质流; 平衡方程用于保证每一个节点均能满足物质守恒定律. PHOSFAD 模型建模公式和主要参数取值可参见文献[3, 12].

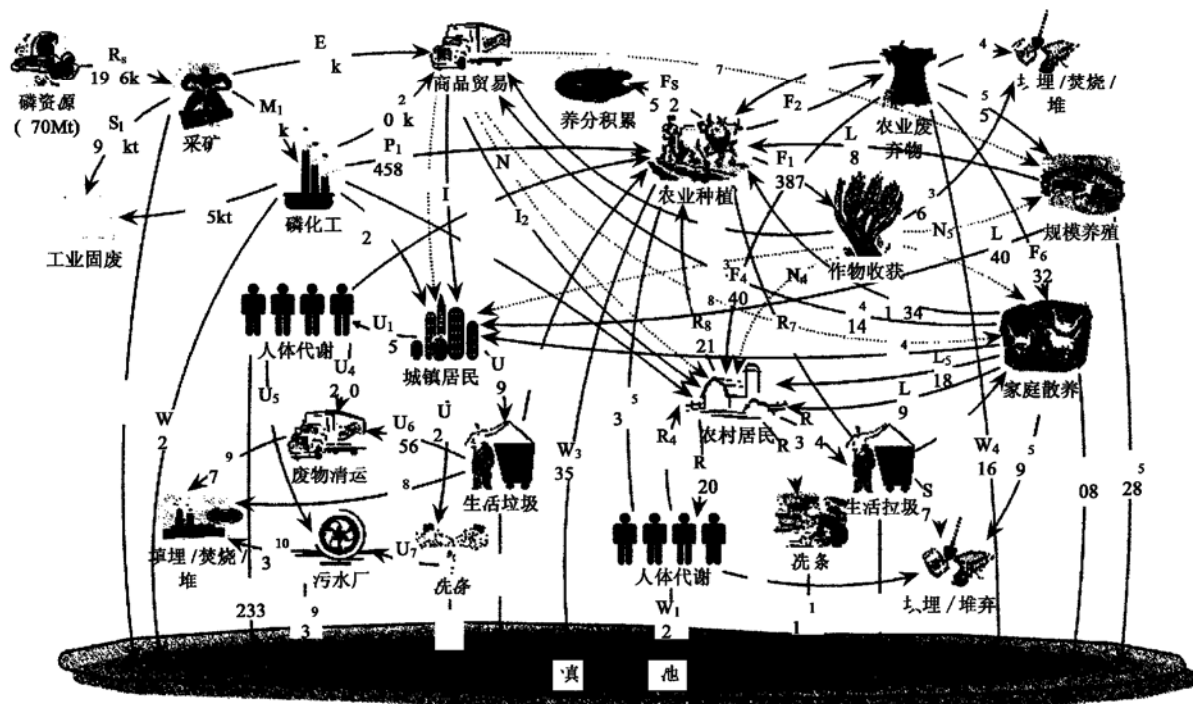


图 2 2000 年滇池流域磷物质流循环静态模型 (PHOSFAD) 示意/t

Fig. 2 Static phosphorus flow analysis model of Dianchi Basin (PHOSFAD) in 2000/t

4 滇池流域磷物质流结构和物质利用效率

4.1 物质流结构特征分析

PHOSFAD 模型的总体结构特征可用图 3 表示. 从物质输入来看, 磷矿开采与农畜产品贸易输入构成的直接物质投入量 (DMI) 表征了流域社会经济系统的物质消耗强度. 2000 年, 滇池流域 DMI(P) 达到 102.5 万 t, 其中磷矿采掘业是影响 DMI 的决定性因素. 农作物和畜禽产品输入量分别约为流域内

农畜产品产量的 422.1% 和 9.6%, 虽然其物质流绝对通量相对 DMI 较小, 但却相当于降低了本地农业生产强度, 因而减轻了流域生态特别是水体环境压力. 磷矿开采过程中产生的废矿、尾矿通量, 表征流域资源开采效率及其潜在的生态环境影响. 由于这部分物质流不进入流域社会经济系统, 通常也不纳入常规环境经济统计口径中, 故将其称之为“隐流”过程. 隐流与 DMI 之和构成支撑流域社会经济系统运行的物质需求总量 (TMR), 该指标全面真实地反

映出流域物质利用的总体强度. 2000 年滇池流域隐流通量强度与磷矿石产量相当, 由此 TMR(P) 达到 197.9 万 t.

输出至外流域的各类含磷产品, 排放到流域生态环境系统中的废弃物以及隐流构成流域总体物质输出, 由于不考虑磷在社会经济系统中的物质累积, 其通量强度等于 TMR. 2000 年滇池流域提供 77.2 万 t 的 P 输出外流域, 占 DMI 的 75.3%, 表明流域磷代谢体系具有典型的外向型特征. 磷矿石和磷化工产品是输出外流域物质通量的主要部分, 其相应

的开采和生产过程产生的固体废弃物对于流域生态造成较大影响, 并可通过淋溶过程对滇池水质产生潜在危害. 2000 年滇池流域蔬菜和花卉的 P 物质输出强度为 191t, 约占流域产量的 55% 和 40%. 蔬菜、花卉地施肥强度高、周边排水系统发达, 更容易造成磷养分流失. 根据 PHOSFAD 模型, 蔬菜花卉输出外流域导致 90.4 万 t 的 P 流失, 约占农田化肥流失量的 41.4%, 这在很大程度上抵消了粮食作物输入的正面生态效益. 畜禽产品输出与输入通量基本持平, 因此畜禽产品贸易对流域内养殖业的生态环境压力

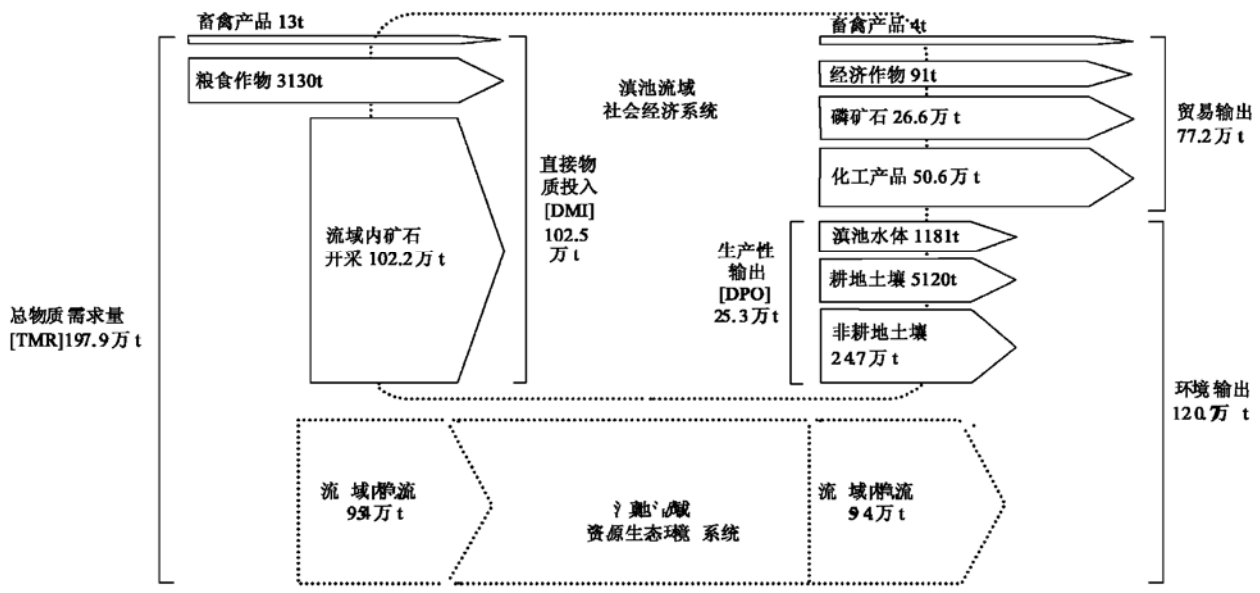


图 3 基于 PHOSFAD 模型的滇池流域磷代谢体系总体结构

Fig. 3 Aggregated physical structure of phosphorus metabolism in Dianchi basin based on the PHOSFAD model

不产生结构性影响.

2000 年滇池流域排放 (P) 代谢“废物”120.7 万 t, 其中隐流约占 79.0%. 流域社会经济系统的生产性输出 (DPO) 达到 25.3 万 t, 相当于 DMI 的 24.7%, 即每单位物质投入量将产生约 1/4 的废弃物. 大量工业废渣以及生活废弃物通过填埋、堆放、焚烧等处置方式进入非耕地土壤, 是构成 DPO 的支配通量, 如图 3 所示. 通常这部分磷难以再次得到回收和利用, 从而造成严重的资源浪费, 这也表明滇池流域磷污染控制体系技术路线选择不合理, 它过分强调末端治理而非资源再生. 其次, 种植业生产效率低下导致磷肥施用总量中约 70.7% 的磷为耕地土壤所固定和累积, 这显著加大了磷养分随农田排水和淋溶过程流失的风险, 也进一步增加了化肥施用量. 另外, 2000 年滇池水污染负荷 (P) 为 1181t, 是造成滇池水体富营养化的直接原因. 比较而言,

流域磷代谢系统向水体输出的物质流通量强度较小, 仅为 DMI 的 0.1%, 同时考虑到系统渗漏的普遍性, 因此采用传统单一的末端截污和处理技术必然导致较高控制成本和较大生态风险, 且难以实现水体富营养化防治目标.

4.2 物质利用效率特征分析

以物质输入为基准, 可定义生产和消费部门及整个系统的物质生产率、污染排放率、土壤累积率、养分循环率, 如表 1 所示. 由于城乡居民子系统为最终消费部门, 故不讨论其物质生产率. 表 1 同时给出 2000 年滇池水体负荷来源构成.

通过比较部门的物质利用效率可知, 在由采掘业、化工业、种植业、养殖业、居民生活所构成的磷养分传递链中, 从上游到下游各部门的物质生产率依次降低, 污染排放率逐步上升; 同一部门的土壤累积率与养分循环率呈反比关系, 其中畜禽养殖粪便大

量以有机肥形式返回农田,土壤累积率不足 5%;而种植业和城市居民子系统的土壤累积率高达 70%左右,大量磷不再进入流域社会经济系统,直接加剧流域生态环境压力.上述部门的物质利用效率决定了流域磷代谢体系的总体效率特征:系统中主要物质循环途径是施用有机肥,而大量工矿业废渣和生活废弃物以简单堆放和填埋为主要处置手段,造成系统整体物质利用效率较低.

表 1 2000 年滇池流域磷代谢系统的物质利用效率及输出水体负荷

Table 1 Substance use efficiencies of phosphorus metabolic regime of Dianchi Basin and water pollution loads in 2000

项目	物质利用效率/%				水体(P) 负荷/t
	物质 生产率	污染 排放率	土壤 累积率	养分 循环率	
采掘业	51.7	0.0	48.3	0.0	2
化工业	67.6	0.0	32.4	0.0	28
种植业	18.2	5.1	73.3	3.4	367
规模养殖	7.3	5.0	0.0	87.7	28
家庭养殖	4.9	5.6	4.8	84.7	108
城镇居民	—	25.9	67.6	6.5	477
农村居民	—	17.4	9.9	72.7	171
系统整体	39.0	0.1	60.7	0.2	1 181

城镇居民、种植业、农村居民、家庭养殖 4 个子系统的水污染排放强度分别占水体总负荷的 40.4%、31.1%、14.5% 和 9.2%,累积百分比达到 95.1%,是滇池水体最主要的磷负荷来源,由于有效控制工矿业点源以及高强度施用有机肥,采掘业、磷化工业和规模养殖业对滇池水体影响较小.

5 结论

(1) 基于 PHOSFAD 模型,滇池流域社会经济体系中存在若干不利于水体富营养化控制的结构缺陷.低效率开采将显著加速流域内磷矿资源的耗竭速率,其产生的高通量强度物质隐流可对滇池水体环境造成潜在影响.

(2) 高密度发展以经济效益为驱动、以外销为导向的蔬菜和花卉种植产业,对于滇池水体生态修复和污染控制极为不利.虽然其客观上刺激了有机肥施用,减轻了流域畜禽养殖业发展的环境压力,但同时也显著降低了种植业本身的物质利用效率并加剧农田养分流失.

(3) 城乡之间、农村与农田之间的传统养分链断裂,致使城乡居民生活废弃物成为滇池流域的主要污染来源.

(4) 控制滇池水体富营养化,应根据生态原则调整流域磷物质流结构,提高生产和消费部门的物质

利用效率,转变末端污染控制模式,推进流域磷循环系统整体的生态化转型.相关措施包括积极探索采矿业生态影响及其污染防治对策,稳定工业点源达标排放,推进大农业产业结构调整,推广农田精准化施肥,建立区域种养平衡管理体系,加快城乡环境基础设施建设,尽快开展城乡居民生活污染源头控制对策研究和示范实践.

参考文献:

- [1] Ayres R U, Simonis U E. Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development [M]. Tokyo/ New York/ Paris: United Nations University Press, 1994.
- [2] Matthews E, Amann C, Bringezu S, *et al.* The Weight of Nations: Material Outflows from Industrial Economies [R]. Washington DC: World Resources Institute, 2000.
- [3] Liu Y. Phosphorus flows in China: physical profiles and environmental regulation [D]. Wageningen, the Netherlands: Environmental Policy Group, Department of Social Sciences, Wageningen University, 2005.
- [4] Chen Jǎning, Zhang Tiǎnzhu, Du Peng-fei. Assessment of water pollution control strategies: a case study for the Dianchi Lake [J]. Journal of Environmental Sciences, 2002, 14(1): 76~ 78.
- [5] Cropper M L, Oates W E. Environmental economics: a survey [J]. J. Economic Literature, 1992, 30(2): 675~ 740.
- [6] Bouman M, Heijungs R, van der Voet E, *et al.* Material flows and economic models: an analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models [J]. Ecological Economics, 2000, 32(2): 195~ 216.
- [7] Bringezu S, Moriguchi Y. Material flow analysis [A]. In: Ayres R U, Ayres L W, ed. A handbook of industrial ecology [M], Cheltenham, UK/ Northampton MA. USA: Edward Elgar, 2002. 79~ 90.
- [8] Kleijn R. In= Out: the trivial central paradigm of MFA? [J]. Journal of Industrial Ecology, 2000, 3(2-3): 8~ 10.
- [9] Daniels P L. Approaches for quantifying the metabolism of physical economies: a comparative survey, part II: review of individual approaches [J]. J. Industrial Ecology, 2002, 6(1): 65~ 88.
- [10] Udo de Haes H, van der Voet E, Kleijn R. From quality to quantity: substance flow analysis (SFA), an analytical tool for integrated chain management [A]. In: Bringezu S, Fischer-Kowalski M, Kleijn R, *et al.* ed. Wuppertal special 4 [C], Germany: Wuppertal Institute, 1997. 32~ 42.
- [11] Liu Y, Mol A P J, Chen J. Material flow and ecological restructuring in China: the case of phosphorus [J]. Journal of Industrial Ecology, 2004, 8(3): 103~ 120.
- [12] Liu Y, Chen J, Mol A P J. Evaluation of phosphorus flows in the Dianchi Watershed, southwest of China [J]. Population and Environment, 2004, 25(6): 637~ 656.
- [13] 昆明市环保局. 滇池流域水污染防治“十五”计划[R]. 2002.
- [14] 郭慧光, 马丕京. 滇池环境综合治理框架及其投资估算[J]. 云南环境科学, 2000, 19(增刊): 109~ 112.
- [15] 陈吉宁, 李广贺, 王洪涛. 滇池流域面源污染控制技术研究[J]. 中国水利, 2004, 9: 47~ 50.
- [16] 清华大学环境科学与工程系. 环滇池生态保护规划: 环湖截污和环湖生态规划[R]. 2003.